Erfindungsbeschreibung

Linearisiertes MEMS-System und Ansteuerungsregime (Linearized MEMS System and Actuation Regime)

Kurzfassung

Die Erfindung betrifft die Linearisierung des Zusammenhangs zwischen dem Ansteuerungssignal und dem Auslenkungsverhalten in MEMS-Systemen, insbesondere elektrostatisch, piezoelektrisch oder magnetisch angetriebenen Vorrichtungen. Kernidee ist das Design einer elastischen Elektrode mit einem geeigneten Arbeitspunkt sowie die Vorverzerrung des Ansteuerungssignals, um Nichtlinearitäten wie Spannungsversteifung, Coulomb-Nonlinearität und quadratische Abhängigkeiten der Kraft von der Spannung zu reduzieren. Das Ergebnis ist eine überwiegend lineare Systemantwort über einen breiten Arbeitsbereich. Anwendungsfelder umfassen MEMS-Lautsprecher, Mikrospiegel, Inertialsysteme, Positioniersysteme, Greifer sowie weitere MEMS-Aktoren. Vorteile sind erhöhte Linearität, geringere Verzerrung, verbesserte Auflösung bzw. Empfindlichkeit sowie größere Einsatzflexibilität.

Keywords: Linearisierung MEMS-Systeme, Ansteuerungsregime, elastische Elektrode, Vorverzerrung des Ansteuerungssignals, Nichtlinearitätskompensation

Abstract

The present invention relates to the linearization of the relationship between the drive signal and the displacement in MEMS systems, particularly electrostatically, piezoelectrically, or magnetically driven devices. The core idea is to design an elastic electrode at an appropriate operating point and to pre-distort the drive signal to reduce nonlinearities such as voltage stiffening, Coulomb nonlinearity, and the quadratic dependence of the electrostatic force on the applied voltage, resulting in a largely linear system response over a broad operating range. Applications include MEMS loudspeakers, micro-mirror devices, inertial systems, positioning systems, grippers, and other MEMS actuators. Advantages include higher linearity, lower distortion, improved resolution/sensitivity, and greater applicability.

Keywords: MEMS system linearization, drive signal pre-distortion, elastic electrode, actuation regime, nonlinearity compensation

1 Erfindende und Autoren

Anton Melnikov
Bert Kaiser
Franziska Wall

Fraunhofer-Institut für Photonische Mikrosysteme (IPMS), Maria-Reiche-Str. 2, 01109 Dresden

2 Technisches Gebiet

Die Erfindung bezieht sich auf Elektromechanische Systeme. Bevorzugt mikro-elektromechanische Systeme und besonders bevorzugt siliziumbasierte mikroelektromechanische Systeme.

MEMS-Bauelemente weisen Zusammenhänge zwischen dem Ansteuerungssignal und dem Auslenkungsverhalten der Aktuatoren (und vice versa) auf. Dieser Zusammenhang kann nichtlinear und linear sein. Viele Anwendungen bedürfen eines speziell designten Zusammenhangs oft mit dem Ziel einer möglichst geringen Nichtlinearität. In anderen Worten formuliert: es wird ein möglichst linearer Zusammenhang angestrebt bei dem das Ansteuerungssignal möglichst proportional zu einer Änderung des Auslenkungsverhaltens führt. Die Proportionalität soll dabei möglichst wenig von Zustand (zeitlich und elektromechanisch) des Systems unmittelbar und in der Historie abhängig sein. Am Beispiel eines elektrostatischen MEMS Systems ist der Zusammenhang insbesondere mit der Änderung der elektrischen Kapazität des Antriebes korreliert.

Systeme aus MEMS und Ansteuerung bei dem diese Erfindung relevant sein kann umfassen insbesondere Schallwandler für den Hörschallbereich und benachbarte Frequenzbereiche, Mikrokippspiegel, Inertialsysteme, Positioniersysteme, Greifer, Aktuatoren für kontinuierlichen begrenzten, nicht kontinuierlichen und für unbegrenzten Vortrieb (Inchworm).

Diese vorgenannten Systeme und Weitere profitieren in ihrer Anwendung von einem linearisierten Zusammenhang. In der Regel wird damit ein Ausgangssignal erreicht welches die Eigenschaften darauf aufbauender Produkte verbessert hinsichtlich technischer und nutzerorientierter Aspekte. Zum Beispiel kann ein Schallwandler dadurch eine geringere Verzerrung aufweisen und somit einerseits in einem weiteren Leistungsbereich (bspw. lauter) genutzt werden und andererseits das Nutzererlebnis durch besseren Klang verbessern. Ein weiteres Beispiel sind Aktuatoren die durch eine Linearisierung präziser gesteuert werden

können und damit eine bessere Auflösung, Empfindlichkeit oder Auslenkung (technisch) erreichen können und somit umfassendere Erkenntnisse bspw. in einem Messgerät erlauben.

Die Erfindungsidee hier bezieht sich auf eine Vorrichtung und ein Verfahren um den Zusammenhang zwischen Ansteuerungssignal und Auslenkungsverhalten zu linearisieren. Diese Linearisierung betrifft insbesondere elektromechanische Systeme, zu denen elektrostatisch, piezoelektrisch oder magnetisch angetriebene Systeme gehören.

3 Stand der Technik/ Charakteristik der bisherigen bekannten Lösungen

Darstellung bekannter Lösungen, insbesondere recherchierte Patentanmeldungen, und deren Nachteile mit Bezug auf die Darstellungen zur abgeleiteten Aufgabe der Erfindung

In der**DE102021208318A1** wird offenbart, wie eine Ansteuerung eines MEMS-Lautsprechersystems erfolgen kann, um einen verringerten Klirrfaktor und damit eine erhöhte Linearität zu erzeugen. Dies wird maßgeblich durch die Nutzung eines nicht-rückgekoppelten Regelschleife erreicht, um das Signal zu begrenzen. Nachteilig ist, dass das Signal entsprechend der Offenbarung einzig im Zeitbereich verzerrt wird, nicht jedoch die Auslenkungsfunktion berücksichtigt.

Lösungen in der Mechanik durch „Balanced" Ansatz des IPMS

In der **EP3867191A1** wird offenbart, wie eine Vorrichtung eines MEMS aussehen kann, sodass bereits durch die mechanische Gestaltung die Auslenkungen linearisiert werden – ohne dass das Signal vorverzerrt werden müsste. Dies wird erreicht in dem eine symmetrische Elektrodenanordnung gewählt wird, deren Symmetrie sich gerade auf die Wirkung der Nichtlinearitäten bezieht. Dadurch heben sich ebendiese in zumindest einem bestimmten Arbeitsbereich ganz oder teilweise auf. Nachteilig ist die zwingende Implementierung in Hardware und die daraus in der Praxis resultierende Unsicherheit in der Implementierung – bspw. durch Fertigungsabweichungen.

Dürr et al. (Micro-actuator with extended analog deflection at low drive voltage) beschreiben eine Möglichkeit zur Linearisierung der Auslenkungskennlinie von Aktuatoren mithilfe von Federn. Die Federn besitzen eine nicht lineare Rückstellkraft.

4 Darlegung der Erfindung

In allen elektrostatischen Aktuatoren ist die Aktuatorkraft bei gegebener Konfiguration und Auslenkung proportional zum Quadrat der Spannung. Die erfindungsgemäße Aufgabe ist es einen Zusammenhang zwischen Ansteuerungssignal und Auslenkung des bzw. innerhalb des MEMS-Systems zu linearisieren.

Die Aufgabe wird mit dieser Erfindung gelöst durch das Design einer elastischen Elektrode mit einem geeigneten Arbeitspunkt und durch eine Vorverzerrung des Ansteuerungssignals.

Gegenüber der bekannten Lösung 2021P64286 „Kompensation von Nichtlinearitäten ohne die Änderung des Kennlinienarbeitspunktes und –bereiches“ (Fraunhofer IDMT) wird vorteilhaft ein geringerer Aufwand in der Modellierung in Steuerungsschaltung notwendig.

Gegenüber der bekannten Lösung 2018F61362„BIEGEWANDLER ALS AKTOR, BIEGEWANDLER ALS SENSOR, BIEGEWANDLERSYSTEM“ (Fraunhofer IPMS) wird vorteilhaft ein geringerer Aufwand in der Vorrichtung möglich. Das heißt die Lösung ist universell auf prinzipiell alle Ausgestaltungen von Vorrichtungen anwendbar, so denn die Vorverzerrung darauf mithilfe der Erfindung angepasst wird.

Der Vorteil der Erfindung gegenüber der bekannten Lösung von Dürr et al. (Micro-actuator with extended analog deflection at low drive voltage) besteht darin, dass diese leichter anwendbar ist.

5 Ausführungsbeispiele (Beschreibung der Figuren)

In der Figur 1 wird eine einfache Ausführung eines MEMS basierten Mikrolautsprechers dargestellt, wo durch das Anlegen einer elektrischen Spannung eine erste (elastische) Elektrode gegen eine zweite (starre oder elastische) Elektrode angezogen und dadurch deformiert wird, wobei eine Luftverdrängung entsteht in dem elektrostatischen Spalt entsteht. Dabei besteht die elektrische Spannung aus einem konstanten Anteil Udc und einem vorverzerrten Signalanteil Uac (gekennzeichnet durch f(Uac)). Das System beinhaltet von Natur aus mindestens drei Nichtlinearitäten, die Spannungsversteifung, die Änderung der Feldstärke aufgrund des sich ändernden Spaltabstandes (Coulomb Nichtlinearität) und eine quadratische Abhängigkeit der elektrostatischen Kraft von der angelegten Spannung.

Die Figur 2 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit der Wahl der Arbeitspunkte basierend auf der Abhängigkeit der Eigenfrequenz von der Udc Spannung. Dabei werden die geometrischen Abmessungen der elastischen Elektroden so gewählt, sodass in dem Eigenfrequenzverlauf

Stellen mit einer horizontal verlaufenden Tangente entstehen, welche als Betriebspunkte verwendet werden. An diesen Betriebspunkten heben zwei der nichtlinearen Quellen gegenseitig auf, nämlich die Spannungsversteifung und die Coulomb Nichtlinearität, sodass die quadratische Abhängigkeit der Kraft von der elektrischen Spannung übrigbleibt.

Die Figur 3 zeigt ein Ausführungsbeispiel mit einem Design eines breiten Arbeitsbereiches, welcher durch die geometrischen Abmessungen eingestellt wird. In dem Arbeitsbereich erfährt die elastische Elektrode keine Änderung oder nur eine geringe Änderung der Eigenfrequenz. Dabei ist eine Ansteuerung mit sehr großen Uac Signalamplituden möglich, welche in einer ähnlichen Größenordnung wie die Udc Spannung liegen können.

Die Figur 4 zeigt eine Ausführung der Signalabhängigkeit, wo das Signal mit einer Wurzelfunktion vorverzerrt wird. Dies ermöglicht die Elimination der quadratischen Abhängigkeit der Kraft von der Spannung in der Systemantwort. Eine Vorverzerrung nach Figur 4 kann in Kombination mit den in der Figur 2 und 3 dargestellten Ausführungen kombiniert werden, sodass die mechanische Systemantwort linear wird. Ziel der Signalabhängigkeit ist es den spezifischen Verlauf der Antriebskapazität zu invertieren. Das Signal würde also für einen typischen Plattenkondensator invers bikubisch in guter Näherung die Nichtlinearitäten beseitigen.

6 Möglicher Aufbau und Inhalt der Ansprüche

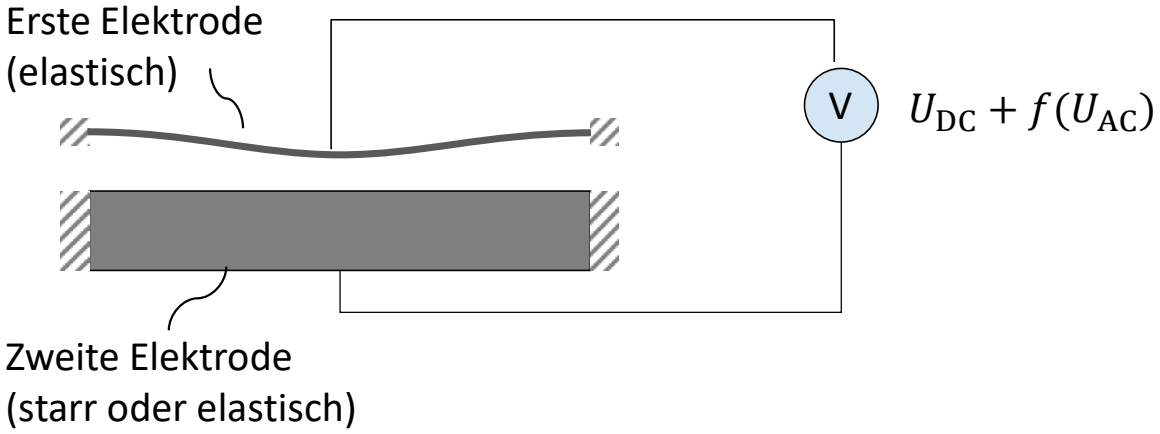
MEMS mit mindestens einer elastischen Elektrode und einer Ansteuerungseinrichtung kennzeichnend mit mindestens einem Filter für das Ansteuerungssignal U

MEMS mit Elektroden, deren Abstand veränderbar ist, kennzeichnend mit mindestens einem quadratischen Filter für das Ansteuerungssignal U

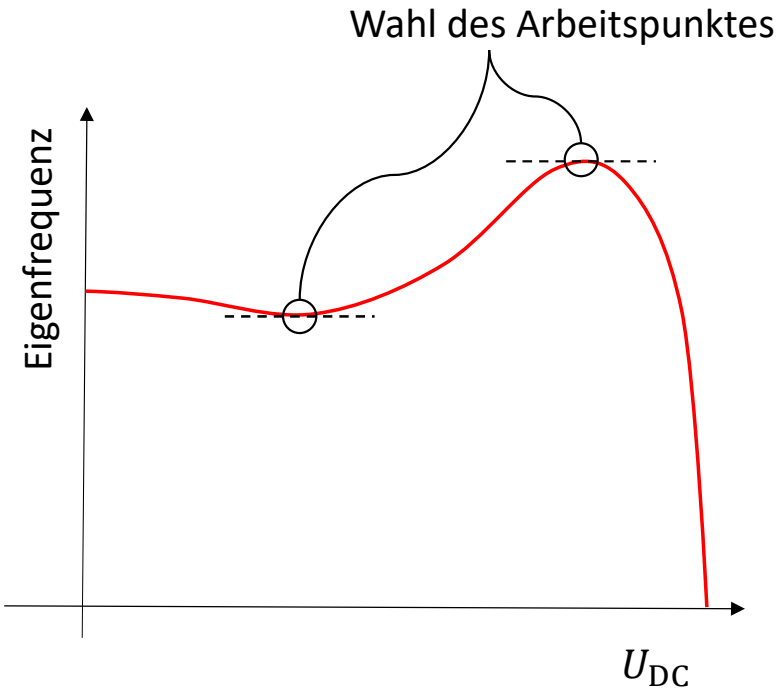
Kennzeichnend ist ein bikubischer Filter, der die Eigenart der Kapazitätsvariation invertiert und somit w=f(U) linearisiert

MEMS mit einem der vorangehenden Merkmale, der als eines aus einer MEMS-Pumpe, einem MEMS-Lautsprecher, einem MEMS-Mikrophon, MEMS-Messgerät ausgeführt ist.

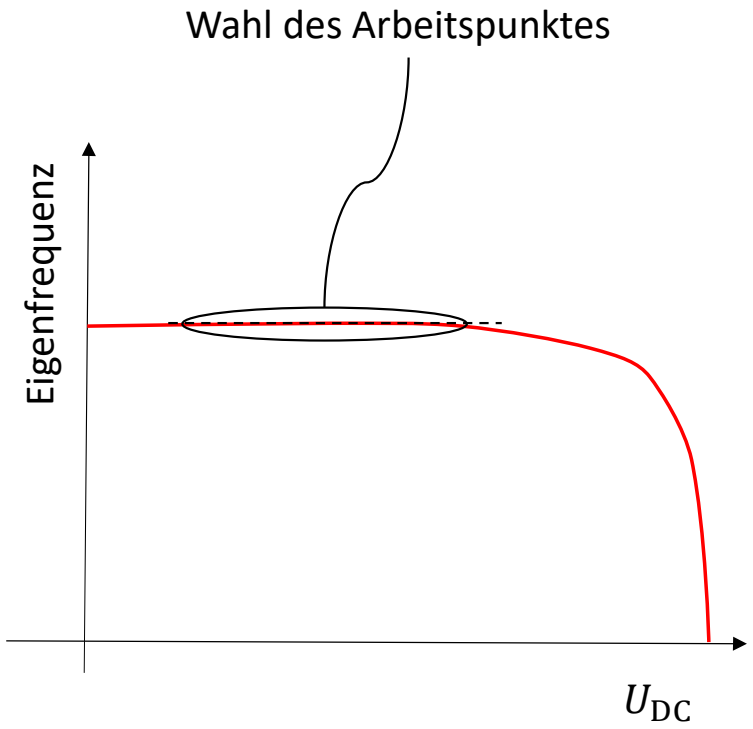
Figur 1


Erste Elektrode
(elastisch)
V
$U_{\mathrm{DC}} + f(U_{\mathrm{AC}})$
Zweite Elektrode
(starr oder elastisch)

Figur 2



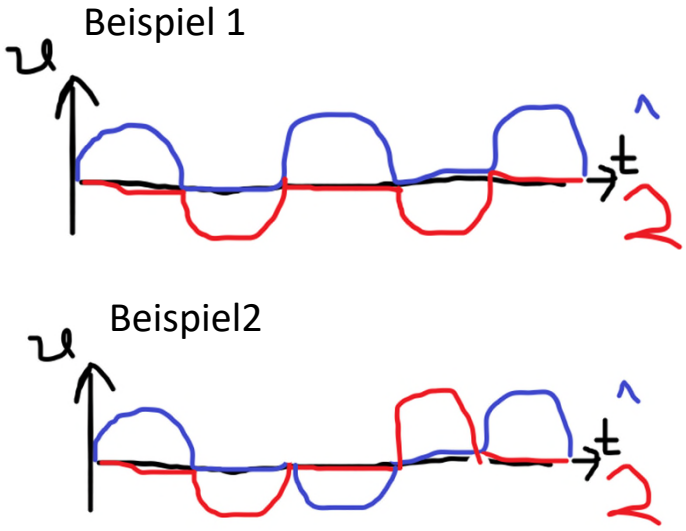
Figur 3

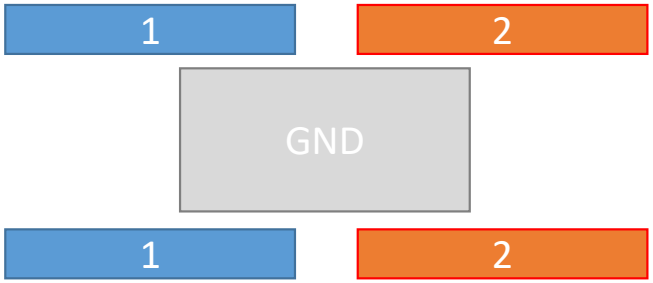


Figur 4

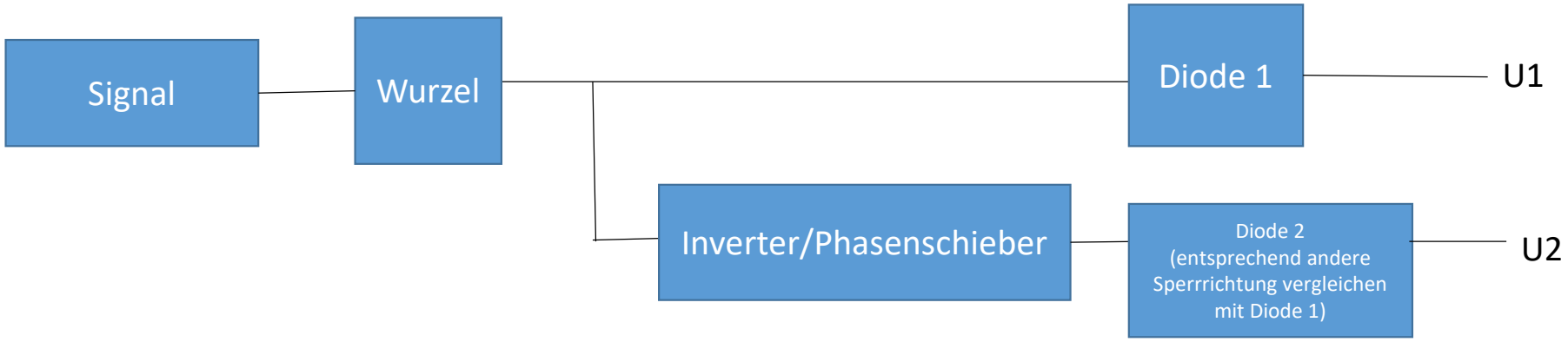
$$f(U_{\mathrm{AC}}) = \sqrt{U_{\mathrm{AC}}}$$

Figur 5

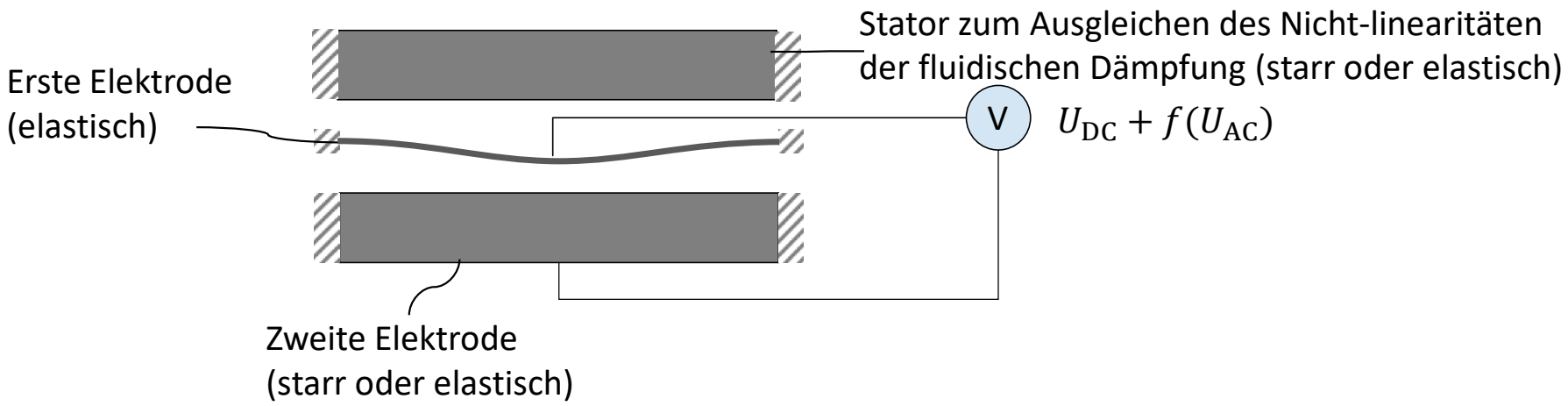




Figur 6


Signal
Wurzel
Diode 1
U1
Inverter/Phasenschieber
Diode 2
(entsprechend andere
Sperrrichtung vergleichen
mit Diode 1)
U2

Figur 7


Stator zum Ausgleichen des Nicht-linearitäten der fluidischen Dämpfung (starr oder elastisch)
Erste Elektrode (elastisch)
V
$U_{\mathrm{DC}} + f(U_{\mathrm{AC}})$
Zweite Elektrode (starr oder elastisch)